

延时可配置的全光缓存器阵列

王拥军¹ 吴重庆² 王 智² 尚 超¹ 杨昭怡¹ 忻向军¹

(¹北京邮电大学电子工程学院信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)
²北京交通大学理学院光信息所, 北京 100044)

摘要 提出一种以基于平行排列 3×3 耦合器的双环耦合全光缓存器为缓存主体、以非线性光纤环路镜或马赫-曾德尔干涉仪为选择开关的可动态配置延迟的全光缓存器阵列方案。理论与实验证明, 该缓存器阵列可实现不同延迟时间的配置, 输出信号能满足进一步传输的要求, 并可有效降低网络拥塞, 减少丢包率。

关键词 光通信; 全光交换; 全光缓存器; 可配置延迟时间; 光控光开关

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706019

All-Optical Buffer Array with Configurable Delay Time

Wang Yongjun¹ Wu Chongqing² Wang Zhi² Shang Chao¹ Yang Zhaoyi¹ Xin Xiangjun¹

(¹ State Laboratory of Information Photonics and Optical Communication, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)
² Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A new all-optical buffer array scheme with dynamic configurable delay time is proposed, in which the dual-loop optical buffer (DLOB) based on 3×3 collinear fiber couplers is the main part and the nonlinear optical loop mirror (NOLM) or Mach-Zehnder interferometer (MZI) is the optical controllable optical switch. Its operation principle is analyzed. The theoretical analysis and experiment demonstrate that delay time can be configured flexibly, and the signals from the buffer can satisfy the transmission requirement. The proposed optical buffer can eliminate network congestion, and reduce packet loss rate effectively.

Key words optical communications; all-optical switch; all-optical buffer; configurable delay time; optical controllable optical switch

OCIS codes 060.4510; 200.4490; 060.1155; 130.4815

1 引 言

随着光波分复用、时分复用、正交频分复用等复用技术的研究与应用, 单根光纤的通信容量已经突破了 30 Tb/s, 光纤通信似乎展现出取之不尽的带宽资源, 但是, 到目前为止, 这些资源还未带来诸多便利, 造成这种困惑的主要原因是通信网络中交换容量的限制^[1]。虽然波分复用系统中使用的动态波长分配可以解决网络拥塞, 增加组网的灵活性, 但是这种以波长为交换粒度的交换方式远不能满足灵活多变的网络需求。目前通信网络中的交换仍然在电域中进行, 由于“光/电”、“电/光”转换及“电子瓶颈”的限制, 电域交换所提供的容量远没有达到传输技术发展所提供的通信容量。全光分组交换(OPS)由

于具有粒度细、速度高、吞吐量大、路由丰富、配置灵活等优点, 被认为是解决交换瓶颈的终极方案之一。类似于目前电域中的分组交换, OPS 采用存储转发的交换模式, 为了满足不同分组大小、不同的服务等级以及适应不同拥塞等情况, OPS 网络中的光缓存器需要容纳各种不同大小的光分组、提供各种不同的缓存时间, 并能根据网络拥塞情况灵活配置。不同于电域中的缓存方法, 以光学双稳态为基础的光触发器目前仅处在原理探索阶段, 在状态、转换时间、制作工艺等方面远不能达到 OPS 网络中要求的高速度与大容量。目前, 对光缓存器的研究集中在使用何种方法使光信号在有限的传输介质中获得可配置的延迟时间。文献[2]提出了一种树状的折叠

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61077014, 61077048)、中央高校基本科研业务费专项资金(2009CZ07)

作者简介: 王拥军(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤通信与光传感等方面的研究。E-mail: wangyj@bupt.edu.cn

结构光缓存器,把获得相同延迟时间的光纤的长度减少了一半;文献[3]利用有源垂直耦合器构成的 4×4 的开关矩阵,配置不同长度的光纤,组成了4个延迟环,通过控制各开关的 on/off 状态可以灵活地实现 $1\sim 9999$ 个单位延迟;文献[4]提出一个结合环形与树状的混合结构,使得光纤延迟线得到有效的利用。但是,这些光缓存器方案存在明显的不足:文献[2]树状结构,使用了大量的半导体光放大器(SOA)与3 dB耦合器,结构比较复杂,并需要高功率的光纤放大器进行功率补偿;文献[3]中的有源垂直耦合开关,需要注入一个大电流,在有源层中形成载流子梯度,实现注入光的偏折,其基本结构还是一种电控光开关;文献[4]中的混合结构中 SOA 也是一种电控光开关结构,不适用于全光交换。

本课题组已提出了基于平行排列 3×3 耦合器的双环结构全光缓存器(DLOB),对其单个缓存器及级联结构的缓存性能进行了设计与分析^[5-6],并使用反相光脉冲控制方法^[7]在一个四级级联结构中成功实现了 $1\sim 9999$ 个单位延迟^[8-9]。在DLOB中,右环为主环,其中有较长的光纤延迟线。按照DLOB的缓存原理,即使数据分组不需要缓存,也必须经过一次右环,使过路分组产生不必要的延迟;在级联DLOB结构中,各个单元的环长不同,当数据分组的长度大于某个单元的缓存深度时,该缓存单元的缓存功能失效,数据分组需要绕过该缓存单元的右环,由于SOA对数据分组不同部分的非线性作用不同,使得输出数据分组产生信号损伤;此外,当一个较大的数据分组到达时,如果信道没有足够的资源容纳这么大的数据分组,该数据分组将被放到光缓存器暂存,随后,一个小的数据分组到达该端口,而信道中有充分的资源容纳小数据分组,但是,光缓存器却被前面的大数据分组占据,使小数据分组无法通过缓存器而被丢弃。因此,级联DLOB缓存结构存在过路延迟大、易产生信号损伤、丢包率高等缺点。本文提出以DLOB作为基本缓存单元,以非线性光环路镜(NOLM)或马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构作为光控开关,组成一种可寻址的全光缓存器阵列,可以有效解决过路延迟、信号损伤及丢包率高等问题。文献[2-4]中,虽然也具有缓存单元的选择功能,但是,其中的开关均为电控方式。因此,本文提出的结构对全光缓存器的研究具有一定的借鉴作用。

2 延时可配置的全光缓存器阵列结构及性能分析

本文提出的全光缓存器阵列结构如图1所示,其中上面虚线框中的部分为由 $k+1$ 个不同环长的DLOB构成的光缓存器;下面虚线框中的部分为 $k+1$ 个光缓存器所对应的 $k+1$ 个地址选择器,用来对数据分组能否进入该缓存器进行选择。DLOB的主要元件为平行排列的 3×3 耦合器,将其4、6端口相连构成DLOB的主环,1、3端口相连构成副环,2为DLOB的输入、输出端口。当光信号从DLOB的中间端口2输入,4、5与6端口分配到的功率比为 $50:0:50$,且4、6端口光信号电场矢量的相位相同,4、6端口的光信号分别按顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向沿主环传输,如果主环中不存在相移器件,沿两个方向传输的光信号绕主环一圈到达 3×3 耦合器的4、6端口时具有相同的强度与相位,1、2与3端口分配到的光功率为 $0:100:0$,即光信号从2端口输出。如果在主环中引入非线性相移器件SOA2,通过波分复用器(WDM1)向SOA2中注入不同于信号光波长的高功率的控制光脉冲,使控制光脉冲与CW方向的信号同步且脉冲宽度完全覆盖信号光,由于SOA偏离主环的中心放置,限制数据包的长度,避免CW与CCW方向的信号光在SOA2中相遇,有或无控制光引起SOA2中不同的载流子浓度,这样,CW与CCW的信号光在SOA2中将会经历不同的增益与相移。设CW与CCW的光信号经过SOA2后的增益与相位分别为 G_{cw} 、 G_{ccw} 与 ϕ_{cw} 、 ϕ_{ccw} ,两个方向的信号光沿主环一周后到达 3×3 耦合器的4、6端口,可以推导出1、2与3端口分配到信号光的电场强度为

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \end{bmatrix} = \exp(-j\phi_{ccw}) \sqrt{G_{ccw}} E_{in} \times \begin{bmatrix} j\frac{\sqrt{2}}{4} \left[1 - \sqrt{\frac{G_{cw}}{G_{ccw}}} \exp(-j\Delta\phi) \right] \\ -\frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{\frac{G_{cw}}{G_{ccw}}} \exp(-j\Delta\phi) \right] \\ -j\frac{\sqrt{2}}{4} \left[1 - \sqrt{\frac{G_{cw}}{G_{ccw}}} \exp(-j\Delta\phi) \right] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 E_{in} 为输入信号光的电场强度, $\Delta\phi = \phi_{cw} - \phi_{ccw}$ 为CW与CCW方向信号光的相位差,与增益之间的关系为

$$\Delta\phi = \phi_{cw} - \phi_{ccw} = -\frac{\alpha}{2} \ln\left(\frac{G_{cw}}{G_{ccw}}\right), \quad (2)$$

式中 α 为 SOA 的线宽增强因子。由(1)式中虚部大小和正负关系可见,不管两个方向的增益有多大差别,1,3 端口的信号光的电场强度总是大小相等,相差为 π 。从(2)式可以看出,相位差取决于 CW 与 CCW 方向信号光的增益,当向 SOA2 中注入高功率的控制光时,信号光的增益由控制光功率与 SOA2 的工作电流决定。调节控制光功率与 SOA2 的工作电流,使 $\Delta\phi = \pi$,1,3 端口的光功率接近最大,2 端口的光功率接近最小,信号光就被写入缓存

器。两个方向的信号光经过副环一圈后其电场强度保持大小相等,相差为 π ,经过 3×3 耦合器后,信号光功率在 4,6 端口平分,相差为 π ,保持 SOA2 的工作状态,即保持 CW 与 CCW 的信号光大小相等,相差为 π ,信号光就会在主副环之间来回环绕,光分组被缓存;当需要读出时,再次向 SOA2 注入控制脉冲,使两个方向上的信号光的相位差再次改变 π ,这时,2 端口得到最大的信号光功率,1,3 端口的信号光功率最小,光分组就被读出。

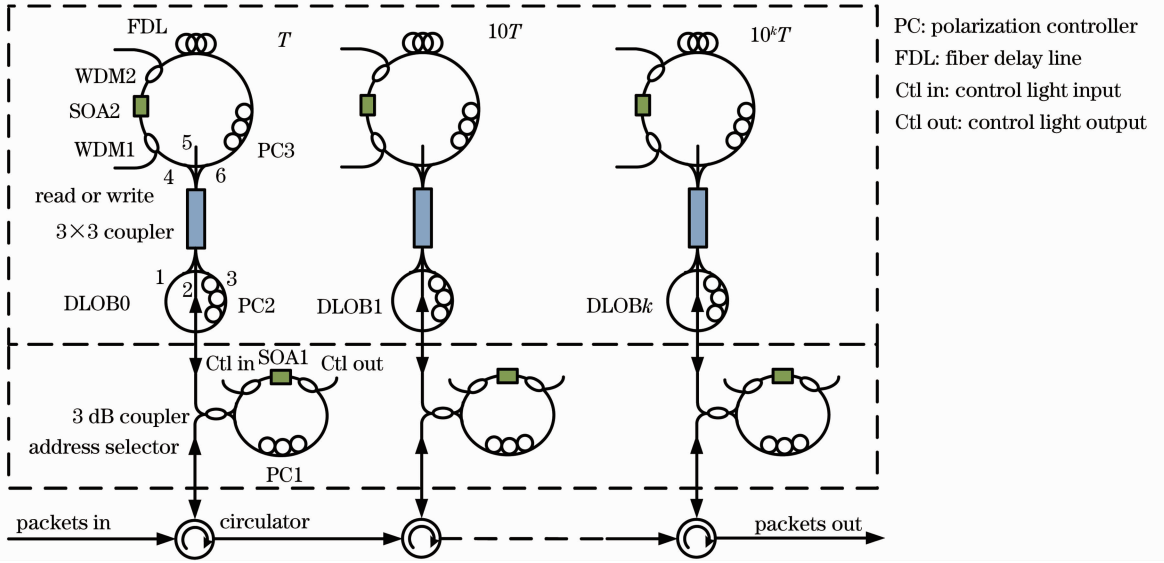


图 1 全光缓存器阵列结构

Fig. 1 Scheme of all-optical buffer array

图 1 下面的虚线框是基于 NOLM 的光控光开关阵列,用来对光缓存器阵列进行地址选择。3 dB 耦合器的 3,4 端口相连构成一光纤环,SOA 作为非线性相移器件偏离光纤环的中心放置。数据分组从 3 dB 耦合器的 1 端口输入,其光功率等分在 3,4 端口,分别沿 CW 与 CCW 方向传输,如数据分组需要进入该级光缓存器,在 SOA 中注入同步控制光脉冲,使其中一个方向的信号光的相位改变 π ,这样,数据分组经过 NOLM 环一圈后从 2 端口输出,进入该级光缓存单元;如果数据分组不需要在该级缓存单元中缓存,不向 SOA 中注入控制脉冲,CW 与 CCW 方向的信号光的相位差为 0,数据分组经过 NOLM 环一圈后从 1 端口输出,经由环形器进入下一级缓存单元。在这种结构中光分组的大小由最小的 DLOB 环长及 SOA 在环中的位置也需要保证 CW 与 CCW 的信号光不会在 SOA 中相遇,因此,各级 NOLM 环的长度与最小的 DLOB 环长基本相等,这样过路光分组的延时被充分减小。这种光控光开关的显著缺点是不必要的过路

延迟与包长限制带来的灵活性缺陷。

为了消除过路延迟与包长限制,地址选择开关可以用图 2 所示的 MZI 结构来代替。数据分组从 3 dB 耦合器的 1 端口输入,在 3,4 端口分成功率相等的两份,分别沿 MZI 的上下两臂传输,如果数据分组需要在 DLOB1 中缓存,则从 Ctl in 口向 SOA 注入一个控制光脉冲,使 MZI 上臂的信号光的相位改变 π ,数据分组将从 MZI 的 7 端口输出经过光环形器进入 DLOB1;如果数据分组不需要在 DLOB1 中缓存,不向 SOA 中注入控制光脉冲,数据分组将从 MZI 的 8 端口进入下一级缓存单元。这种结构的优点是过路数据分组的延迟为 0,并且不需要限制数据分组的长度。由于 MZI 上下臂中的信号光不是沿同一个光路传输,要在 MZI 输出口上得到正确的输出关系,必须保证上下两臂的光路长度相等,并且上下两臂上信号光的偏振方向一致。对于分立元件构成的 MZI,实验室条件下比较难以实现,但方案中的无源器件耦合器、波分复用器、环形器、延迟线与有源器件 SOA 都可以进行光学集成,经过四级缓

存,该方案可以实现 0~9999 个可配置的单位延迟。

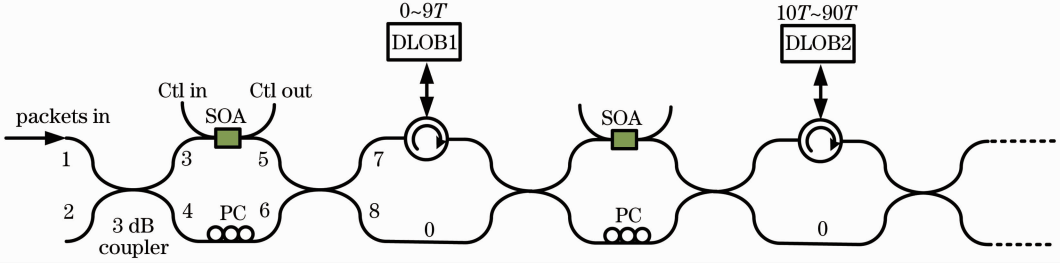


图 2 以 MZI 为光控开关的全光缓存器阵列

Fig. 2 All-optical buffer array with MZI as optical switch

从上面两种全光缓存器阵列的结构可以看出, DLOB 是缓存器阵列的主体,对缓存器阵列的性能起决定作用。由于光分组多次经过 SOA, SOA 的非线性增益、交叉增益调制(XGM)、交叉相位调制(XPM)、载流子寿命等都会带来的缓存器输出的脉冲形状畸变, SOA 自发辐射噪声的累积造成的缓存器输出信号的信噪比(SNR)下降,以及随着缓存圈数 k 的增加输出信号光功率减小等因素制约着缓存器的性能。因此,必须从理论上对影响缓存器性能的上述因素进行分析。

脉冲畸变一般是由 SOA 的非线性增益、XGM、XPM 及载流子恢复时间引起的。分析脉冲畸变需要建立光脉冲通过 SOA 时的传输方程及 SOA 的动态增益方程。当综合考虑 SOA 的载流子消耗、载流子加热、光谱烧孔、双光子吸收、非线性折射率及 SOA 的放大自发辐射(ASE)噪声和群速度色散时,光脉冲在 SOA 中的传输方程及局部增益系数 g 可以表示为^[10]

$$\frac{\partial A(z, \tau)}{\partial \tau} - \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z, \tau)}{\partial \tau^2} = \frac{1}{2} \frac{g - \epsilon_2 P^2}{1 + \epsilon_1 P} - \frac{j}{2} \left[\alpha_N g - \alpha_T \frac{\epsilon_1 g P + \epsilon_2 P^2}{1 + \epsilon_1 P} A(z, \tau) \right] - \left(\Gamma_2 \gamma + j \Gamma'_2 \frac{\omega_0}{c} n_2 \right) \frac{1}{\sigma} P A(z, \tau) - \frac{1}{2} a_{\text{int}} A(z, \tau), \quad (3)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{g_0 - g}{\tau_c} - \frac{1}{E_s} \frac{g - \epsilon_2 P^2}{1 + \epsilon_1 P} P + \Gamma_2 \gamma' P^2, \quad (4)$$

式中 $A(z, \tau)$ 是光脉冲的慢变振幅, $P = |A(z, \tau)|^2$, β_2 是二阶群色散系数, ϵ_1 是由载流子加热和光谱烧孔引起的非线性增益压缩系数, ϵ_2 是由双光子吸收引起的非线性增益压缩系数, α_N 是由载流子浓度引起的线宽增强因子, α_T 是温度引起的线宽增强因子, Γ_2 是双光子吸收限制因子, Γ'_2 是非线性折射率有关的限制因子, γ 是双光子吸收系数, γ'

$= \alpha_N \beta_2 / (h\nu \sigma^2)$, σ 是 SOA 有源区的有效面积, n_2 是非线性折射率, τ_c 是载流子寿命, ω_0 为信号光的中心角频率, a_{int} 为损耗系数, c 为光速, g_0 为小信号增益系数, E_s 为 SOA 的饱和能量。(3),(4)式没有解析解,采用分步傅里叶法和分段法进行数值求解,可以得到光脉冲在 SOA 中的演化情况。反相光脉冲控制法中,缓存时,由于控制光的功率较大, SOA 处于深度饱和状态,在信号光相对于控制光较小的情况下,可以有效降低非线性失真。因此采用反相光脉冲控制法,提高控制光与辅助光的功率,使脉冲在 SOA 中循环累积的非线性失真降低到最小。当输入为 3 阶超高斯随机序列时,计算得到经过 60 圈缓存后的归一化输出码流如图 3 所示,可以看出,在缓存器中经过 60 圈延迟,输出的光脉冲码流的形状保持完整。因此,通过使用反相脉冲控制法,基本消除了脉冲畸变对缓存性能的影响。

制约光缓存器输出性能的另一重要因素是输出信号的信噪比。由于 SOA 存在 ASE 噪声,当信号光多次经过 SOA 后,ASE 噪声的积累会导致输出信号信噪比下降。对于 DLOB,可以使用文献[8]中的简化模型估算其输出信噪比,计算结果如图 4 所示,由于在对缓存器的写入与读出过程中,控制光的功率较低,信号光处于放大状态,在缓存过程中,控制光饱和了 SOA,抑制了信号光的噪声,因此多级缓存(曲线 2)的信噪比要比单级缓存(曲线 1)的信噪比高。经过 4 级 9999 个单位延迟后,信噪比大于 10 dB。在实际操作过程中,通过对控制光功率、SOA 的工作电流及环路增益等参数的优化,经过 4 级缓存,输出信号光的信噪比通常可以达到 19 dB。

为了获得较大的信号光功率,一般调节环的增益使其在缓存期间略小于 1,在写入与读出过程中,信号光被放大,经过 4 级缓存后,输出的信号光功率与输入信号光功率接近。

综上所述,这两种可配置延迟时间的光缓存器

阵列在理论上是可以实现的。

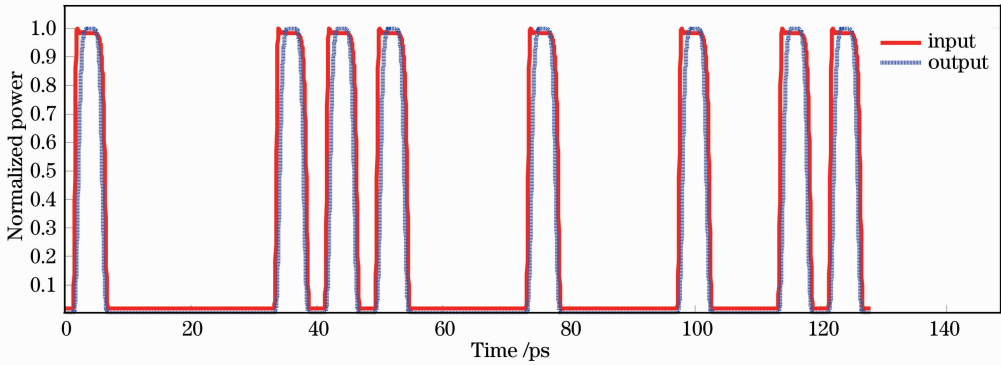


图3 输出波形

Fig. 3 Output waveform

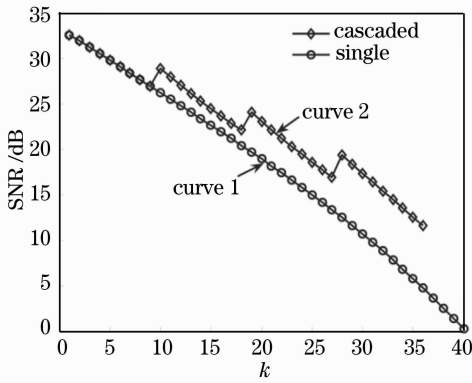


图4 信噪比与缓存圈数的关系

Fig. 4 SNR versus buffered cycles k

3 实验系统与结果分析

图5是搭建好的一个两级全光缓存器阵列的实验系统，DLOB0和DLOB1的光纤长度分别为116 m和54 m，两个控制NOLM环光控开关的长度约200 m，可编程脉冲发生器(PPG)发出速率为2.488 Gb/s的三个数据分组A、B与C，分别包含

600,128,128 bit,三个分组相互间隔200 ns,并且20 μ s重复一次。激光器1(LD1)发出波长为1556.56 nm、功率约为1.5 mW的连续光经过MZI调制器,光分组A、B与C的输出功率约为700 μ W。控制激光器2、3、4、5(LD2、LD3、LD4、LD5)的波长为1553.8 nm,DLOB与NOLM环都使用反相脉冲控制法,控制光的高光平均约为6.10 mW,低光平均约为2 mW。外部控制单元(CU)接收PPG发出的同步(syn)信号,产生与数据分组同步的控制信号,并加到控制激光器的输入端,产生NOLM环的选通信号或DLOB的读写信号。光分组A首先到达缓存单元0,并需要在DLOB0中缓存10圈,CU控制LD2发出一个覆盖分组A的反相选通控制光脉冲,分组A由NOLM0进入DLOB0中;CU控制LD4发出写入控制光脉冲,分组A被写入DLOB0中,并在DLOB0中按“8”字型环绕。分组A在DLOB0缓存期间,分组B到达第一级缓存单元,这时,DLOB0中已经被分组A占用,并且没有足够的空间容纳分组B,但后面的DLOB1空闲,分组B通过

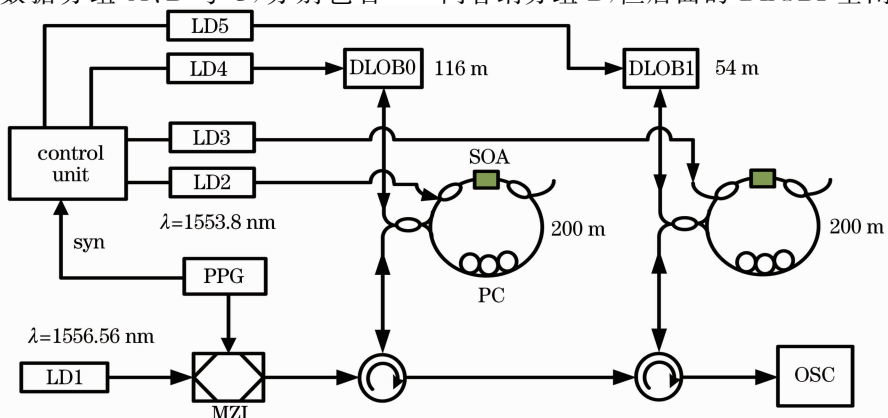


图5 实验系统

Fig. 5 Experimental system

NOLM0 环开关进入下一级缓存单元。CU 控制 LD3 发出 NOLM1 的选通光脉冲, 分组 B 进入 DLOB1 中, 并在 LD5 的同步写入脉冲作用下在 DLOB1 中环绕; 这时, 分组 C 到达缓存节点, 假设此时线路空闲, 则分组 C 需要从缓存器直接输出, 保持两个 NOLM 环中的 SOA 为开状态, 控制光为高光平状态, 分组 C 依次经过 NOLM0、NOLM1 输出; 分组 B 在 DLOB1 中缓存 10 圈后, 控制 LD5 发出读出反相读脉冲, 并保持 LD3 为高光平状态, 分组 B 则从缓存器输出; 类似于前面的读出与写入过程, 分组 A 在 DLOB0 中缓存 10 圈, 再进入 DLOB1 中缓存 10 圈, 最后从缓存器输出并进入示波器 (OSC) 进行记录。

图 6 为光示波器记录的输出波形, 其中“leak A0”为分组 A 在 NOLM0 中的“漏光”, “leak A1”

为分组 A 在 NOLM1 中的“漏光”, “leak B1”为分组 B 在 NOLM1 中的“漏光”^[7-8], 分组 C 为过路方式, 没有漏光。可以看出, 输入的分组次序为 A、B、C, 输出分组次序变成了 C、B、A; 分组 A 在两级缓存单元中延迟了约 $10.5 \mu\text{s}$, 分组 B 在次级缓存单元中延迟了约 $3.7 \mu\text{s}$; 输出数据分组的光功率超过 $400 \mu\text{W}$, 波形细节保持完好; “漏光”功率在 $90 \sim 120 \mu\text{W}$, “漏光”的存在对节点上的信号产生干扰, 通过调整 SOA 的工作状态, “漏光”还有改善的余地。图 7 为示波器记录的数据分组 A、B 与 C 的眼图及计算的误码率 (BER, R_{BER}) 与输入信号光功率的关系曲线, 可以看出, 经过两级开关与两级缓存的不同组合后, 分组 A、B 与 C 的眼图十分清晰, 信号光功率大于 -16 dBm 时, 分组 C 误码率小于 10^{-8} 。

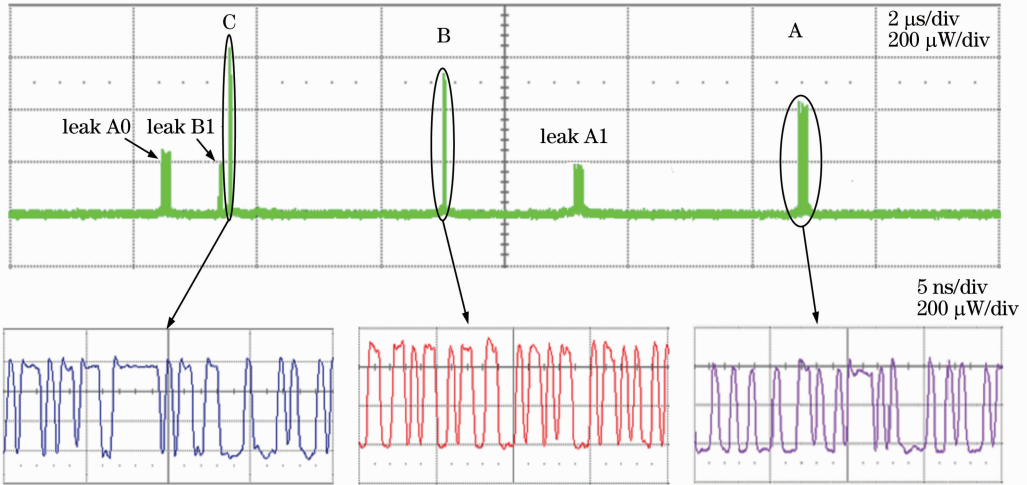


图 6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

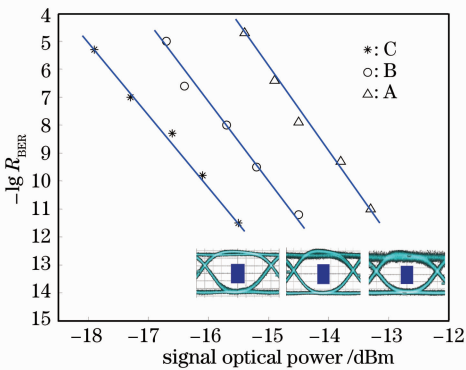


图 7 误码率与眼图

Fig. 7 Bit error rate and eye diagrams

用基于 3×3 耦合器的 DLOB 作为缓存主体, NOLM 环或 MZI 作为光控光开关, 可对交换节点的光分组在光缓存器中的延迟时间进行灵活的配置, 并可有效地降低网络拥塞, 减小丢包率。理论分析与实验证明, 光分组在该缓存阵列中完成不同的延迟时间后, 光信号的幅值仍可达到 $400 \mu\text{W}$, 误码率小于 10^{-8} , 能满足进一步传输的要求。该缓存结构对全光缓存器的研究具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 J Gripp, M Duelk, J E Simsarian, *et al.*. Optical switch fabrics for ultra-high capacity IP routers [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(11): 2839-2850.
- 2 Yong-Kee Yeo, Jianjun Yu, Gee-Kung Chang. A dynamically reconfigurable folded-path time delay buffer for optical packets switching[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(11): 2559-2561.

4 结 论

提出了一种可选址型全光缓存器阵列结构, 利

- 3 Nan Chi, Zhuoran Wang, Siyuan Yu. A large variable delay, fast reconfigurable optical buffer based on multi-loop configuration and an optical crosspoint switch matrix[C]. OFC, 2006. OFO7.
- 4 Xinwan Li, Limei Peng, Jianping Chen, *et al.*. A novel fast programmable optical buffer with variable delays[C]. NFOEC, 2008. JThA41.
- 5 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Wang Zhi, *et al.*. Signal impairment analysis of optical controlled apparatus caused by semiconductor optical amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 4042–4048.
王拥军,吴重庆,王智,等. 半导体光放大器引起的光控器件总的信号损伤分析[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4042–4048.
- 6 Yongjun Wang, Chongqing Wu, Xiangjun Xin, *et al.*. Investigation on performance of all optical buffer with large dynamical delay time based on cascaded double loop optical buffer [J]. Chin Phys B, 2010, 10(9): 094209.
- 7 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da, *et al.*. Investigation on control technique of adjustable double loop optical buffer in large range[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1930–1934.
王拥军,吴重庆,疏达,等. 大范围可调的双环全光缓存器的控制技术研究[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1930–1934.
- 8 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da, *et al.*. Investigation on the large dynamic variable delay range of the optical buffer based on double loop configuration [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 47–53.
王拥军,吴重庆,疏达,等. 基于双环耦合全光缓存器的大动态延迟范围的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 47–53.
- 9 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da, *et al.*. Cascaded all-optical buffer based on double-loop configuration[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 579–601.
王拥军,吴重庆,疏达,等. 双环结构级联型全光缓存器的研究[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 579–601.
- 10 J M Tang, K A Shore. Strong picosecond optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at transparency [J]. IEEE J Quantum Electron, 1998, 34(7): 1263–1269.

栏目编辑：王晓球